

NUMERYCZNE MODELE PROGNOZ POGODY

Streszczenie

W referacie przedstawiono wprowadzenie do problematyki opracowywania numerycznych modeli prognoz pogody. Omówione zostały zagadnienia tworzenia modeli globalnych, regionalnych i mezoskalowych wraz z procedurą tzw. „zagnieżdżenia modeli”. Przedstawiono charakterystykę mezoskalowego modelu UMPL dla obszaru Polski wraz z zasadami konstrukcji siatki obliczeniowej modelu oraz wyborem odwzorowań kartograficznych dla map zawierających horyzontalne rozkłady parametrów meteorologicznych. Oryginalnym wynikiem przeprowadzonych badań jest uzyskiwanie pionowych przekrojów atmosfery wzdłuż dowolnej trasy. Otrzymywane produkty wykorzystywane są do osłony meteorologicznej kraju, a w szczególności do zabezpieczenia działań lotnictwa.

The paper presents a concept of application of non-standard atmospheric parameters charts, determined on the basis of the UMPL (Unified Model for Poland Area) mesoscale model data, to synoptic analysis. Effective weather forecasts for aviation, including additional information about vertical profiles of meteorological elements, require objective forecast of the atmospheric state based on the results of numerical models and remotely sensed data. The procedure can be applied to points of geographical coordinates corresponding e.g. to a planned route of an aircraft.

1. WPROWADZENIE

Dzięki hydrodynamicznym modelom atmosfery oraz komputerom dużej mocy, stało się możliwe tworzenie numerycznych prognoz pogody, tj. prognoz wyliczanych przy użyciu superkomputerów na podstawie równań opisujących zachowanie się atmosfery. Takie prognozy są prognozami obiektywnymi, tzn. niezależnie od tego ile razy zostałyby przeprowadzone obliczenia dla tego samego początkowego stanu atmosfery, uzyskany wynik byłby taki sam.

Do niedawna opracowywanie prognoz pogody było dużo trudniejsze. Wiele czynności wykonywano ręcznie, poczynając od naniesienia danych obserwacyjnych

¹ Dr inż. Sławomir Pietrek jest wykładowcą w Warszawskiej Wyższej Szkole Informatyki oraz w Wojskowej Akademii Technicznej.

na mapę synoptyczną, aby można było zanalizować aktualną sytuację, aż po podanie ostatecznej prognozy, którą synoptyk opracowywał w oparciu o znajomość procesów rządzących ruchem atmosfery, własną intuicję i doświadczenie. Znany w środowisku meteorologicznym jest fakt, że na podstawie tych samych map synoptycznych każdy synoptyk może podać nieco odmienną prognozę, a to za sprawą dwóch ostatnich czynników (intuicji i doświadczenia), które powodują, że taka prognoza jest bardzo subiektywna.

Atmosfera ziemiska jest tak skomplikowanym układem dynamicznym, że nie jest możliwe dokładne (analityczne) rozwiązanie równań, które opisują jej zachowanie (nieliniowe cząstkowe równania różniczkowe). Można jednak używać rozwiązania przybliżone dzięki zastosowaniu metod numerycznych.

W modelach numerycznych pola meteorologiczne opisywane są przez skończoną liczbę punktów. Obliczenia wykonywane są w punktach nazywanych węzłami siatki. Odległość w poziomie pomiędzy sąsiednimi węzłami definiuje poziomą rozdzielczość modelu. Im jest ona mniejsza tym rozdzielczość jest lepsza i więcej szczegółów może być uwzględnionych w modelu. Aby można było prawidłowo prognozować pogodę należy przeprowadzić obliczenia nie tylko dla powierzchni Ziemi, ale również dla wyższych poziomów atmosfery. Na to, co się dzieje przy powierzchni Ziemi mają zwłaszcza duży wpływ procesy zachodzące w najniższej części atmosfery nazywanej warstwą graniczną (w zależności od warunków meteorologicznych warstwa ta może mieć zasięg od kilkuset metrów do kilku kilometrów, chociaż średnio przyjmuje się za jej wysokość 1 km). Ilość poziomów i ich rozkład w pionie definiują pionową rozdzielczość modelu.

Procesy zachodzące w atmosferze charakteryzują się szerokim zakresem skal przestrzennych. O ile ruchy wielkoskalowe mogą być dosyć dobrze opisane przez model to procesy charakteryzujące się małą skalą mogą być albo opisane niedokładnie, albo znaleźć się poza zdolnością rozdzielczą modelu. Procesy zachodzące w małej skali często mają jednak duże znaczenie i nie można ich pominąć. Dlatego stosuje się parametryzacje, które mają na celu uwzględnienie ich wpływu na zjawiska o większej skali. Przykładem zjawiska wymagającego parametryzacji jest konwekcja, która jest ważnym procesem w pionowej wymianie ciepła i wilgotności w atmosferze. Jej skala (1÷10 km) jest znacznie mniejsza niż rozdzielczość obecnie używanych modeli.

Stosowane modele numeryczne można podzielić na: modele globalne (pokrywające całą kulę ziemską), modele regionalne i modele mezoskalowe. Wszystkie modele charakteryzują się określoną rozdzielczością. Najlepiej, gdy ta rozdzielczość jest jak największa. Zwiększenie rozdzielczości oznacza zmniejszenie kroku siatki,

a to prowadzi do wzrostu liczby punktów, w których należy przeprowadzić obliczenia. Idealnym rozwiązaniem byłby model globalny pracujący z dużą rozdzielczością. Do dyspozycji są jednak tylko komputery o skończonej możliwości wykonywania obliczeń w wymaganym czasie.

Często stosowanym sposobem rozwiązania tego problemu jest koncepcja zagnieżdżania modeli. Tzn. model globalny liczony jest z niezbyt dużą rozdzielczością (dużym krokiem siatki), następnie model obejmujący mniejszy obszar liczony jest z większą rozdzielczością, z kolei inny model jest liczony dla jeszcze mniejszego obszaru i z jeszcze większą rozdzielczością od poprzedniego. Każdy z modeli o dokładniejszej skali otrzymuje dla swoich wartości brzegowych atmosferyczne zmienne stanu z modelu o większej skali.

2. NUMERYCZNE PROGNOZY POGODY DLA OBSZARU POLSKI

Od maja 1997 roku obliczane są codziennie w Interdyscyplinarnym Centrum Modelowania Matematycznego i Komputerowego Uniwersytetu Warszawskiego (ICM) numeryczne prognozy pogody dla obszaru Europy Środkowej z wykorzystaniem modelu UMPL (Unified Model for Poland Area). Obecnie tworzone są one dwa razy na dobę (dla danych początkowych z godziny 00 oraz 06 GMT). Niezbędne do obliczeń dane obserwacyjne oraz boczne warunki brzegowe otrzymywane są z centrum w Bracknell (Anglia). Dane obserwacyjne są transmitowane 8 razy na dobę (mniej więcej co 3 godziny) za pomocą łącza ISDN. Tą samą drogą pozyskiwane są raz na dobę boczne warunki brzegowe (skompresowany zbiór liczy ok. 28 MB). Obliczenia są wykonywane na 16-procesorowym komputerze Cray J916. Uzyskane wyniki są przetwarzane do postaci dogodnej dla użytkownika. Do wizualizacji wyników prognoz używany jest pakiet Vis5D opracowany na Uniwersytecie w Wisconsin.

W zależności od zasobów obliczeniowych i wybranych parametrów kod modelu UMPL umożliwia symulację procesów atmosferycznych od skali globalnej z całkowaniem na okres dziesięcioleci do jednodniowych prognoz mezoskalowych na obszarze nie większym od obszaru Polski. Model wykorzystuje równania „pierwotne”, to jest równania wyprowadzone z zasad zachowania podstawowych zmiennych fizycznych takich jak pęd, masa i energia termodynamiczna. Równania te są zapisane w postaci eulerowskiej, co oznacza, że zmiany czasowe wielkości w danym punkcie siatki powinny być równe odpowiednim czynnikom zmian. Na przykład w przypadku równania pędu poziomego są to: adwekcja, siła gradientu ciśnienia, siła Coriolisa, transport konwekcyjny czy wirowy. Równania są całkowane we współrzędnych sferycznych z wykorzystaniem hybrydowej współrzędnej pionowej. W troposferze, a szczególnie w warstwie granicznej, jest to bezwymiarowa współrzędna, będąca

stosunkiem ciśnienia na danym poziomie do ciśnienia na powierzchni Ziemi. W warstwach górnych współrzędną pionową jest ciśnienie. Taki wybór został podyktowany względami praktycznymi: współrzędną pionową w warstwie granicznej powinna opisywać ukształtowanie terenu, co nie jest potrzebne w stratosferze. Kod modelu uwzględnia dowolną liczbę poziomów, jednakże parametryzacja procesów fizycznych jest ściśle związana z przyjętym sposobem dyskretyzacji.

W modelu mezoskalowym stosuje się 31 poziomów. Do przedstawienia wzorów różnicowych na płaszczyźnie przyjęto regularną siatkę geograficzną, z rozmieszczeniem zmiennych zgodnie ze schematem „B” Arakawy. W celu uzyskania jak najmniejszego zniekształcenia siatki zastosowano zabieg polegający na przemieszczeniu bieguna obliczeniowego w taki sposób, by równik wypadł pośrodku rozpatrywanego obszaru. Dla modelu mezoskalowego zlokalizowanego nad Polską współrzędne bieguna obliczeniowego wynoszą: 19.3°E i 56.0°N, a obszar całkowania zawiera 144 na 116 punktów odległych od siebie o 0.15 stopnia (ok. 17 km). Pochodne czasowe aproksymowano jawnym schematem rozszczepienia, dzieląc obliczenia na dłuższy krok adwekcyjny i krótsze kroki dopasowujące. Ponieważ rozdzielczość modelu (skale ruchu jawnie opisywane przez model) jest ograniczona wielkością siatki modelu, to wpływy skal ruchu mniejszych niż podwójny krok siatki modelu mogą być uwzględnione tylko w uśrednionym, statystycznym sensie. Na przykład składniki zawierające pochodne czasowe ruchów konwekcyjnych opisujących transport wielkości fizycznych za pomocą „wilgotnych” i „suchych” komórek konwekcyjnych są zbyt małe, by mogły być jawnie rozwiązane przez model. Uśrednianie (parametryzacja) dotyczy większości procesów fizycznych opisywanych przez model.

Aktualnie w modelu uwzględnione są następujące procesy fizyczne:

- Model powierzchni lądu - włączono wielowarstwowy model temperatury gruntu i schemat prognozy wilgotności gruntu. Do określenia albedo powierzchni Ziemi wykorzystuje się informację o różnych typach gruntu. Do schematu włączono model wegetacji szaty roślinnej. Wilgoć może pozostawać w listowiu lub być przekazywana do gruntu bądź atmosfery. Stosuje się różne typy wegetacji.
- Warstwa graniczna - turbulencyjny transport pionowy zmiennych podstawowych w warstwie granicznej zależy od lokalnej liczby Richardsona. W obliczeniach współczynników wymiany uwzględnia się obecność lub brak chmur.
- Wielkoskalowe zachmurzenie i opad – chmury wielkoskalowe są opisane przez ich zawartość ciekłej wody (lub lodu). W obliczeniach promieniowania wykorzystuje się całkowitą grubość optyczną chmur. Opad wielkoskalowy jest określany w funkcji zawartości wody lub lodu w chmurze. Uwzględnia się ochładzanie atmosfery na skutek parowania opadu.

- Konwekcja - konwekcyjne procesy podskalowe są modelowane prostym modelem chmury. Konwekcja wpływa na wielkoskalową atmosferę poprzez kompensujące osiadanie, oddawanie powietrza z chmury do otaczającego środowiska, parowanie i opad.
- Promieniowanie - w obliczeniach przenoszenia promieniowania w atmosferze wykorzystuje się sześć pasm dla promieniowania długofalowego i cztery dla promieniowania Słońca. Uwzględnia się wpływ pary wodnej, ozonu, dwutlenku węgla oraz rozkład chmur wielkoskalowych i konwekcyjnych.
- Pozioma dyfuzja - jest przedstawiona poprzez zależne od skali filtrowanie. Proces może być iterowany, co czyni filtrację bardziej selektywną.
- Pionowa dyfuzja - jest niekiedy wymagana do usunięcia oscylacji powodowanych niedokładnym rozwiązaniem dla wewnętrznych fal grawitacyjnych. Wygładzane jest tylko pole wiatru.

Działający w ICM model UMPL jest modelem mezoskalowym (o ograniczonym obszarze). Całkowanie równań różniczkowych na ograniczonym obszarze wymaga zadawania odpowiednich warunków brzegowych w trakcie całego okresu prognozy. Warunki brzegowe zwykle uzyskuje się z modelu regionalnego obejmującego większy obszar, dla którego z kolei warunki brzegowe wytwarza model globalny, całkowany przy zadanych warunkach początkowych. Taki schemat teleskopizacji, stosowany w dużych zagranicznych ośrodkach prognoz numerycznych jest jednak kosztowny, toteż boczne warunki brzegowe dla modelu mezoskalowego UMPL są pobierane z modelu globalnego UKMO o rozdzielczości ok. 60 km w średnich szerokościach geograficznych (od 1998 roku po zwiększeniu rozdzielczości modelu globalnego Brytyjska Służba Meteorologiczna zrezygnowała z modelu regionalnego).

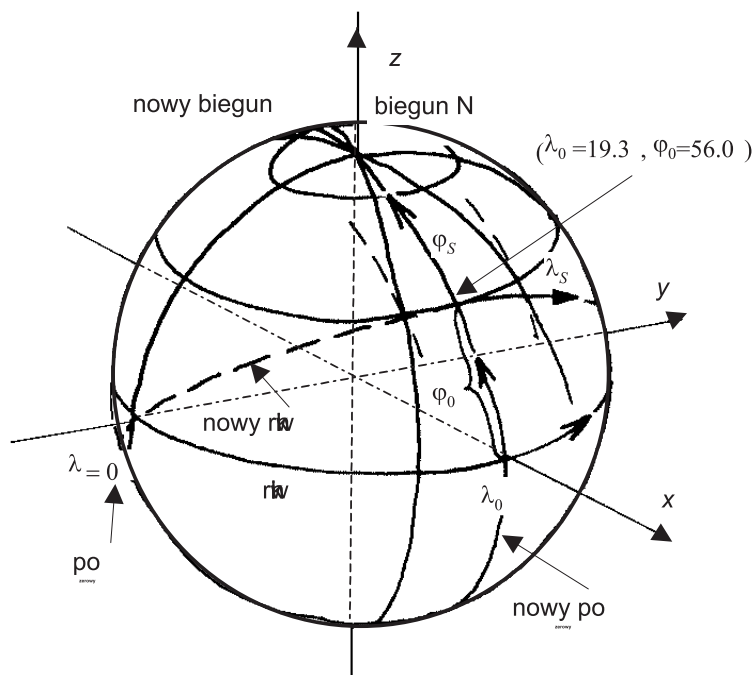
Dane obserwacyjne podlegają kontroli jakości obserwacji. Kontrola odbywa się w trakcie wstępnego przetwarzania. Jej celem jest wychwytywanie losowych błędów w obserwacjach i eliminacja (zaznaczanie) błędnych danych, gdyż z uwagi na czułość systemu istnieje duże prawdopodobieństwo, że system w oparciu o błędne dane wytworzy błędną prognozę stanu atmosfery. System kontroli jakości podejmuje decyzje na podstawie wyników różnych testów, przede wszystkim poprzez sprawdzenie wartości obserwacji z tłem (3-godzinną prognozą na termin obserwacji) oraz poprzez porównanie danych na sąsiednich stacjach akceptując lub odrzucając pomiar po przeprowadzeniu wszystkich sprawdzianów. Na podstawie funkcji rozkładu błędów obserwacji i błędów wstępnego przybliżenia (tła) określa się prawdopodobieństwo a' posteriori „prawdziwego stanu atmosfery”. W trakcie procesu kontroli należy stwierdzić, które obserwacje z dużym prawdopodobieństwem zawierają grube błędy.

Włączenie sprawdzonych i wiarygodnych danych do modelu odbywa się poprzez proces asymilacji. Problemy asymilacji danych w modelu mezoskalowym dotyczą

odpowiedniego zrównoważenia sprzecznych żądań zgodności nowych obserwacji ze stanem atmosfery opisywanym przez model oraz konieczności wykorzystania informacji o zaburzeniach małej skali, które w przypadku procesów szybko zmieniających się mogą znacznie różnić się od tła pamiętanego przez model. W systemie zastosowano opracowaną przez Lorentza metodę analizy korekcji (AC) będącą jedną z odmian wariacyjnej asymilacji danych, w której optymalny stan początkowy określa się poprzez wariacyjną minimalizację funkcji kosztów. Za funkcje kosztów przyjęto sumę miary dopasowania stanu początkowego do obserwacji oraz miary zgodności tego stanu z naszą poprzednią wiedzą o nim. Nowe informacje napływają w odstępach trzygodzinnych a asymilacji podlegają wszystkie dane obserwacyjne zawarte w pięciogodzinnym oknie czasowym wokół terminu analizy.

3. UKŁAD WSPÓŁRZĘDNYCH MODELU UMPL - ICM

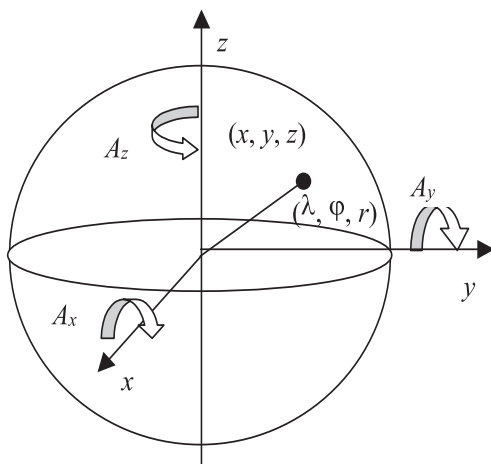
Model UMPL pracuje w układzie przesuniętych współrzędnych geograficznych (λ_s, φ_s) . Układ ten otrzymuje się zmieniając położenie południka zerowego i równika (rys. 1).



Rys. 1. Przesunięte współrzędne geograficzne (λ_s, φ_s) . Początek kartezjańskiego układu współrzędnych (x, y, z) i układu sferycznego (λ, φ, r) umieszczone są w środku Ziemi.

Oś – z układu (x, y, z) pokrywa się z osią obrotu Ziemi. Południk $\lambda_0 = 19.3^\circ$ i równik $\varphi_0 = 56^\circ$ przebiegają przez środek obszaru modelu.

Współrzędne (λ, φ, r) można wyznaczyć dokonując dwóch obrotów - $A_z(\lambda_0)$, $A_y(\varphi_0)$ układu (x, y, z) (rys.2):



Rys. 2. Wyznaczanie współrzędnych (λ, φ, r) . $A_z(\lambda_0)$ obrót osi x i y o kąt λ_0 względem osi z , $A_y(\varphi_0)$ - obrót osi x i z o kąt φ_0 względem osi y , $A_x(\alpha)$ - obrót osi y i z o kąt α względem osi x .

Obroty - $A_z(\lambda_0)$ i $A_y(\varphi_0)$ zdefiniowane są następująco:

$$A_z(\lambda_0) \Rightarrow \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \lambda_0 & -\sin \lambda_0 & 0 \\ \sin \lambda_0 & \cos \lambda_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$A_y(\varphi_0) \Rightarrow \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_0 & 0 & \sin \varphi_0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi_0 & 0 & \cos \varphi_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

gdzie: $(\lambda_0 = 19.3^\circ, \varphi_0 = 56.0^\circ)$ odpowiadają położeniu nowego południka zerowego i równika a (x_1, y_1, z_1) i (x_2, y_2, z_2) są obróconymi współrzędnymi kartezjańskimi.

Aby otrzymać współrzędne (λ_s, φ_s) modelu UMPL wystarczy wartości (x_2, y_2, z_2) , otrzymane z powyższych zależności, wyrazić w układzie współrzędnych sferycznych:

$$\begin{aligned}\lambda_s &= \tan^{-1}(y_2 / z_2) \\ \varphi_s &= \sin^{-1}(z_2 / r) \\ r &= \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}\end{aligned}\tag{3}$$

Bez utraty ogólności w obliczeniach można założyć, że $r = 1$.
Przekształcenie odwrotne tj.:

$$(\lambda_s, \varphi_s) \rightarrow (\lambda, \varphi)\tag{4}$$

jest w tym przypadku złożeniem następujących odwzorowań:

$$\begin{aligned}x_2 &= \sqrt{1 - \frac{\sin^2(\varphi_s)}{\cos^2(\lambda_s)}} \\ y_2 &= \tan(\lambda_s) \sin(\varphi_s)\end{aligned}\tag{5}$$

$$z_2 = \sin(\varphi_s)$$

$$A_y(-\varphi_0) \Rightarrow \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_0 & 0 & -\sin \varphi_0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi_0 & 0 & \cos \varphi_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix}\tag{6}$$

$$A_z(-\lambda_0) \Rightarrow \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \lambda_0 & \sin \lambda_0 & 0 \\ -\sin \lambda_0 & \cos \lambda_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix}\tag{7}$$

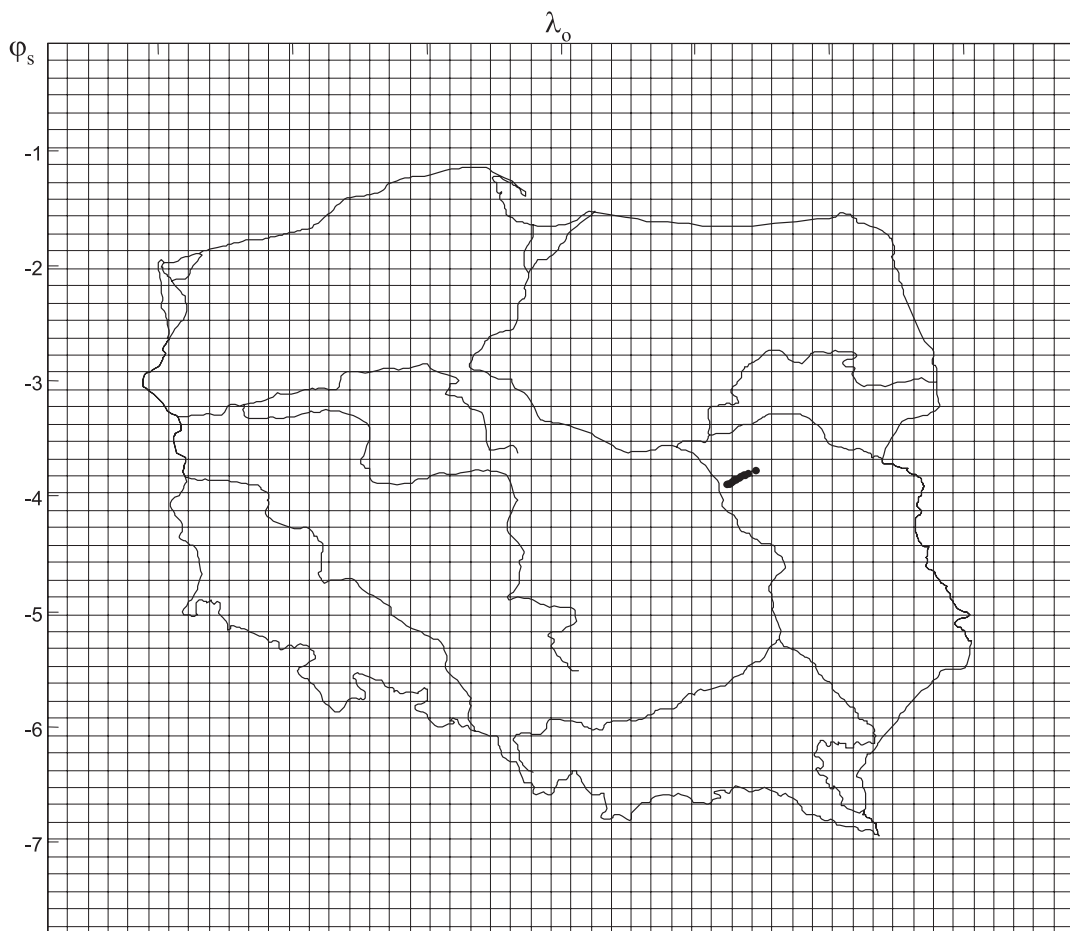
$$\lambda = \tan^{-1}(y / z)$$

$$\varphi = \sin^{-1}(z / r)\tag{8}$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \quad r = 1$$

gdzie: (λ, φ) są zwykłymi współrzędnymi sferycznymi.

Do wizualizacji pól elementów meteorologicznych wykorzystano układ współrzędnych przesuniętych. Wynika to z faktu, że siatka modelu w tym układzie jest prostokątna. Na rys. 3 przedstawiono część siatki (53×53 węzły) wybraną do analizy uzyskanych wyników:

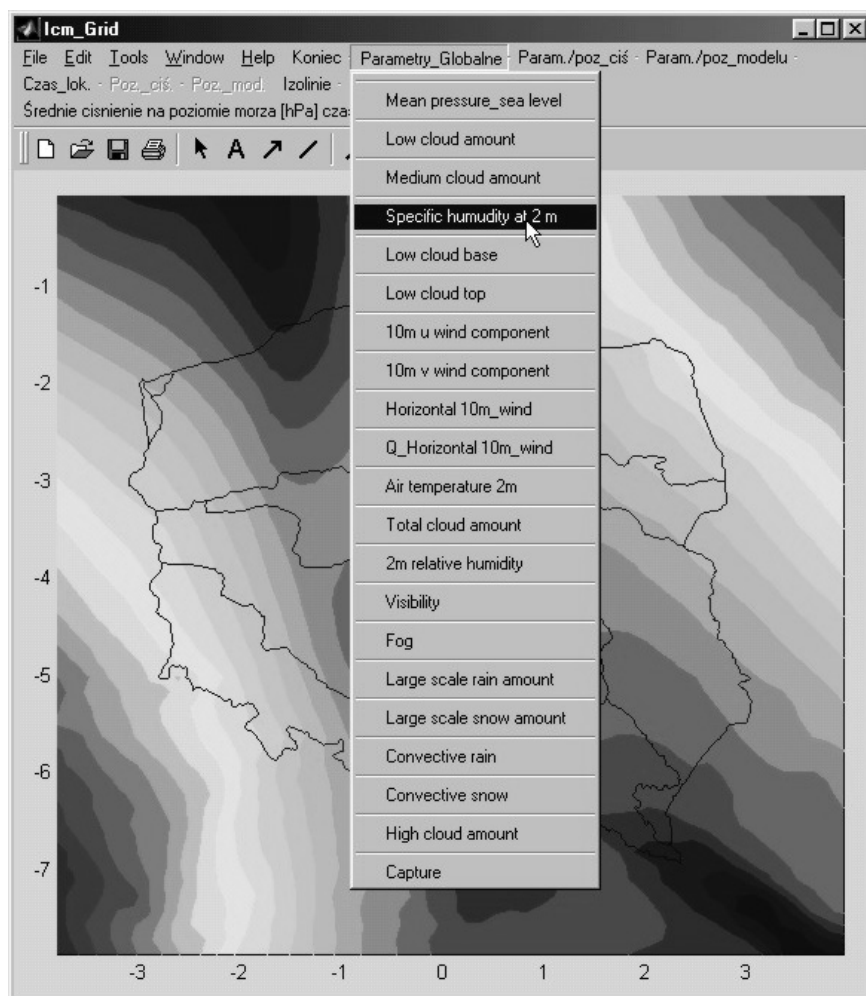


Rys. 3. Prostokątna siatka modelu pokrywająca obszar Polski.

Za początek siatki przyjęto jej górny lewy narożnik (grid(0,0)). Punktowi temu odpowiadają współrzędne $(\lambda_s, \varphi_s) = (-3.825, -0.075)$ deg (jednostka deg oznacza stopień w układzie przesuniętych współrzędnych geograficznych) i $(\lambda, \varphi) = (12.495, 55.737)$. Odstępy między węzłami siatki w kierunku pionowym i poziomym są równe 0.15 deg, co odpowiada rozmiarowi liniowemu ~ 17 km. Linia określona warunkiem $\lambda_s = 0.0$ deg ($\lambda = 19.3$) odpowiada zerowemu południkowi w układzie przesuniętym, który przechodzi przez środek rozważanego obszaru.

4. PODSUMOWANIE

Wyniki obliczeń modelu UMPL można wykorzystać do wykonania graficznych zobrazowań horyzontalnego rozkładu oraz pionowych profili wybranych parametrów meteorologicznych dla obszaru Polski (rys. 4). Wybrano te parametry, które przede wszystkim umożliwiają pełną analizę sytuacji synoptycznej oraz opisują meteorologiczne warunki lotu statku powietrznego.



Rys. 4. Menu wyboru zobrazowań pól parametrów meteorologicznych.

Dane do opisu modelu UMPL pochodzą ze strony internetowej www.icm.edu.pl.

Rozwinięcie treści referatu wraz z graficzną ich prezentacją znajduje się w załączniku Modele_prognoz.ppt.

Literatura

1. Pietrek S., Jasiński J., *A method concept of weather forecasting along an aircraft rout based on numerical model data.*, 18th Conference Weather Analysis and Forecasting, 14th Conference on Numerical Weather Prediction, Fort Lauderdale, USA, 2001
2. Pietrek S., Jasiński J., „*Meteorological Conditions of Aircraft Icing – A Guide for Air and Ground Crews*”, European Conference on Applications of Meteorology ECAM 2005, Utrecht, Holandia, 2005
3. Pietrek S., Jasiński J., Kroszczyński K., *Non-standard synoptic materials preparation based on mesoscale models' data and satellite imagery.*, 5th European Conference on Applications of Meteorology ECAM 2001, Budapeszt, 2001
4. Pietrek S., Jasiński J., Kroszczyński K., „*Wind field over sea analysis and forecast based on NWP model data and digital satellite imagery*”, XIVth International Scientific and Technical Conference “The part of navigation in support of human activity on the sea”, Gdynia, 2004
5. Pietrek S., Kroszczyński K., *Numerical models results application to mesoscale weather forecasting.*, 18th Conference Weather Analysis and Forecasting, 14th Conference on Numerical Weather Prediction, Fort Lauderdale, USA, 2001
6. *Moduł mezoskalowych prognoz pogody dla potrzeb hydrometeorologicznego zabezpieczenia działań wojsk*, Sprawozdanie z realizacji projektu badawczego grant Nr OT00A 067 19, kierownik projektu – S. Pietrek, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 2002

